

直交磁心形電力変換器の解析・設計手法に関する研究

著者	田島 克文
号	1828
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/10635

氏 名 田 島 克 文

授 与 学 位 博士（工学）

学 位 授 与 年 月 日 平成10年5月13日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第2項

最 終 学 歴 平成元年3月

東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻前期課程 修了

学 位 論 文 題 目 直交磁心形電力変換器の解析・設計手法に関する研究

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 荒井 賢一
東北大学教授 阿部 健一

論 文 内 容 要 旨

近年、パーソナルコンピュータなどの情報エレクトロニクス機器の著しい普及に伴い、より信頼性の高い電力供給が求められている。一方、最近の電力系統においては、負荷の増大と多様化による電圧変動、高調波、電磁ノイズなどの諸問題が顕在化している。このような厳しい電源環境から高品質の電力を得るためには、信頼性と機能性の高い電源装置が必要となる。

直交磁心形電力変換器は、原理的に信頼性ならびに安全性が高いという特徴を有する。さらに、最近では、直交磁心と半導体デバイスを積極的に組み合わせた高機能電源が提案され、上記の電源装置への適用が期待されている。例えば、直交磁心形可変インダクタンスは、インダクタンスの連続制御が可能であることから、系統電圧調整用の無効電力補償装置として実用化が進められている。直交磁心形パラメトリック変圧器は、高調波抑制機能及び電氣的ノイズ除去機能を具備する電源装置としての応用が期待されている。さらに、直交磁心と方形波チョップで構成されるdc-ac変換器は、安全性に優れた太陽光発電システムへの適用が検討されている。

以上のごとく、直交磁心形電力変換器は、高品質の電源機器への適用のみならず、地球温暖化対策としての自然エネルギーの有効利用にも有用であることから、その実用化の促進は極めて意義あることと考えられる。

しかし、直交磁心は立体的かつ複雑な磁束分布を有する非線形磁気デバイスであるため、その動作機構の解明には、現在なお多くの問題を残している。さらに、直交磁心と半導体デバイスで構成される変換器の動作解析においては、直交磁心と半導体デバイスの双方の非線形性を適切に考慮する必要があるが、有効な解析・設計手法は未だ提案されていない。これらを解明し、定量的な解析・設計手法を確立することは、実用化に向けた重要な研究課題と考えられる。

従来、直交磁心の設計は、実験の積み重ねに基づく経験的な手法に依存してきたが、直交磁心形電力変換器の適用範囲の拡大のためには、任意の磁心寸法及び磁心材質に対して直交磁心の特性を推定できるような解析手法を開発する必要がある。

一般に、非線形回路解析には、図式解析法、調波平衡法、Runge-Kutta法などの計算手法が用いられてきた。しかし、これらの手法は簡単な回路に対しては適用できるが、直交磁心形dc-ac変換器のように、

チョップと組み合わせた回路では、直交磁心の非線形磁気特性と半導体デバイスの非線形電気特性に加え、スイッチングという非線形動作も考慮する必要があるため、従来の解析手法の適用は困難である。

本研究は、以上の背景のもと、直交磁心形電力変換器の動作解析手法を開発し、最適設計法の確立を目的とするものである。本論文は7章から構成される。以下にその概要を述べる。

第1章 緒言

本章では、本研究の背景、意義及び目的について述べている。

第2章 直交磁心の基礎と応用

本章では、次章以降における考察に必要な直交磁心の基本特性について明らかにするとともに、直交磁心を用いた電力変換器の基本形態、ならびに近年提案されたプッシュプル方式の直交磁心形電力変換器の動作特性について検討している。

まず、直交磁心における磁心磁束と巻線電流の関係について考察を行い、直交磁心が一種の可変インダクタンスとして動作することを明らかにした。次いで、直交磁心の特性を利用した応用機器の基本形態を、可変インダクタンス、パラメトリック変圧器、dc-ac変換器に分類し、その動作原理と特徴を明確にした。

さらに、これらの機器における巻線電流の波形歪みの改善を目的として、近年提案されたプッシュプル方式の直交磁心形電力変換器の基本動作と応用について詳述した。例えば、プッシュプルdc-ac変換器は、任意の直流源から交流系統へ低歪みの電力伝送が可能であり、太陽光などの自然エネルギー源と配電系統間を簡単かつ安全に結ぶための電力変換器としての応用が期待される。プッシュプルパラメトリック変圧器は、ダイオードやサイリスタ整流回路などの非線形負荷時にも入力電流波形は大略正弦波状となるため、高調波抑制機能を具備する交流安定化電源への適用が可能である。さらに、プッシュプル可変インダクタンスは、低歪みかつ高速な制御が可能となるため、例えば、高速無効電力補償装置への応用が期待される。

第3章 三次元非線形磁気回路に基づく直交磁心の解析

本章では、直交磁心の解析・設計手法を与えることを目的とし、三次元非線形磁気回路に基づく直交磁心の特性算定法を提案している。

磁気デバイスの解析手法として、有限要素法による磁界解析が提案されているが、直交磁心は立体的かつ複雑な磁束分布と、強い非線形磁気特性を有するため、有限要素法による磁界解析は大規模な三次元非線形解析となり、計算機容量の制約などから必ずしも実用的ではない。

本論文では、電気機器の解析に古くから使われている磁気回路法を発展させた解析手法を提案した。すなわち、直交磁心をいくつかの直方体要素に分割し、各々を三次元の非線形磁気回路で表現して、直交磁心の磁化特性及び鉄損特性を算定した。本手法による計算値と実測値は良好な一致を示し、本手法が直交磁心の解析法として有用であることが明らかとなった。本解析手法の特徴をまとめると以下ようになる。

- (1) 分割要素数が少なく済むため、解析モデルの構築が容易。
- (2) 材質の磁気異方性や積層方向の特性も考慮した算定が可能。
- (3) 汎用回路シミュレーションプログラムを利用した高速かつ簡便な計算が可能。

第4章 直交磁心形電力変換器の回路解析

直交磁心形電力変換器は、直交磁心と半導体デバイスを組み合わせた回路構成が多く、回路解析には直交磁心と半導体デバイスの双方の非線形特性を考慮する必要があるため、一般に回路方程式は複雑となり、調波平衡法やRunge-Kutta法などの計算手法の適用は必ずしも容易ではない。

これに対し、コンピュータ技術の発達を背景に進展してきた“SPICE” (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)などの汎用回路シミュレーションプログラムでは、半導体デバイスなどの電気電子回路素子の解析モデルが既に組み込まれており、プログラム入力も容易であるため、非線形回路

の解析に多用されている。しかしながら、汎用の回路シミュレーションプログラムに適した非線形磁気デバイスモデルは殆ど提供されていない。

ここでは、SPICE への適用を前提として、抵抗とインダクタ、及び2種類の非線形従属電流源で構成される直交磁心の電気回路モデルを考案した。プッシュプルパラメトリック変圧器ならびにプッシュプルdc-ac変換器の回路解析に適用したところ、定常特性及び過渡特性を高精度で算定できることが明らかとなった。本手法による直交磁心形電力変換器の回路解析は、計算時間も短く、変換器の回路構成が複雑かつ大規模化しても対応が容易という特徴を有する。

第5章 直交磁心の最適設計

第4章で述べた直交磁心の電気回路モデルの回路パラメータは、直交磁心の磁化特性と鉄損特性から決定される。第3章の磁心解析によれば、直交磁心の磁化特性と鉄損特性が算定される。したがって、第3章の磁心解析と第4章の回路解析を連携させることにより、任意の磁心寸法と磁心材質に対する直交磁心形電力変換器の特性を推定することが可能になる。

このような考えに基づき、ここでは、磁心形状による直交磁心の磁化特性の変化について、磁心解析結果に基づいて考察を行い、磁心の形状効果を明らかにするとともに、巻線も含めた直交磁心の単位重量当りの変換電力量が最大となるような最適磁心形状の決定法を与えた。これらの結果に基づいて、プッシュプルdc-ac変換器、ならびにプッシュプルパラメトリック変圧器の設計を試み、それぞれにおいて単位重量当りの出力が最大となる最適な磁心形状を明らかにした。以上より、直交磁心形電力変換器の最適設計指針を提示した。

第6章 直交磁心形電力変換器の回路－磁場連成解析

本章では、より高度な解析を目的として、直交磁心形電力変換器の外部電気回路と、第3章で提案した直交磁心の三次元非線形磁気回路を、適当な変数変換回路を介して結合させ、磁心磁束と回路の電圧ならびに電流を同時に計算する、いわゆる回路－磁場連成解析を提案した。本手法をプッシュプルパラメトリック変圧器とプッシュプルdc-ac変換器の解析に適用したところ、極めて高い精度で変換器の定常特性ならびに過渡特性を算定できることが明らかとなった。

本解析法は動的な状態における直交磁心の磁束分布の振舞いを把握できるため、直交磁心形電力変換器の最適設計のみならず、高性能化あるいは新しい応用の開発に有用であることを指摘した。

第7章 結言

本章では各章ごとの成果をまとめ、総括を行った。

審査結果の要旨

近年、高度情報通信社会の進展にともない、より信頼性の高い電源装置が求められている。直交磁心形電力変換器は、電圧調整、過負荷保護、ノイズフィルタなどの機能を有し、高信頼度の要求に適した電源装置として期待されるが、直交磁心が立体的かつ複雑な磁束分布を示す非線形磁気デバイスであるため、直交磁心形電力変換器の定量的な動作解析には、現在なお未解決な点が多い。本論文は、直交磁心形電力変換器の磁心解析と回路解析、ならびに最適設計手法について研究した成果をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、直交磁心形電力変換器を3種類の基本形態に分類してその特徴を明らかにするとともに、近年提案されたプッシュプル方式の直交磁心形電力変換器の動作機構について検討を行い、高調波電流除去など、新たな応用の可能性を見出している。

第3章では、直交磁心をいくつかの直方体要素に分割し、各要素を三次元の非線形磁気回路で表現することにより、磁化特性及び鉄損特性を算定する手法を提案している。本解析手法によると、磁気特性の非線形性と異方性、及び磁心の積層効果を考慮した計算が容易であるため、少ない要素分割で精度の良い解が得られることを明らかにしている。これは実用上重要な成果である。

第4章では、直交磁心形電力変換器は直交磁心と半導体回路で構成されることが多い点に着目し、汎用の電子回路シミュレータに適した直交磁心の電気回路モデルを考案している。直交磁心形電力変換器の回路解析に適用し、定常特性ならびに過渡特性を高い精度で算定できることを明らかにしている。これは、非線形磁気デバイスを含む電気電子回路の解析手法として高く評価される。

第5章では、直交磁心形電力変換器の設計手法について述べている。すなわち、前章までの研究成果にもとづき、直交磁心の寸法および材質が指定されたときの電力変換特性を推定するための系統的手法を与えている。さらに、直交磁心の形状効果について詳細な検討を行い、単位重量当りの出力が最大となるような磁心形状を明らかにしている。これは、最適設計指針を与える有用な知見である。

第6章では、直交磁心の三次元非線形磁気回路と外部電気回路を、適切な中間回路によって結合させ、磁心と回路を同時に解析する、いわゆる回路－磁場連成解析について述べている。これは、動的な磁束分布を考慮した高度な解析手法を提示するものとして興味深い成果である。

第7章は結言である。

以上要するに本論文は、これまで明確でなかった直交磁心形電力変換器の解析・設計手法を確立したもので、磁気工学およびパワーエレクトロニクス的发展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。